倒“V”型栅板偶极子天线设计

王卫东[1]，谢欢欢[1]，刘鹏[1]，董亮[2]
(1.中国电子科技集团公司第二十研究所，陕西 西安 710068;
2.中国科学院云南天文台，云南 昆明 650216)

摘 要：射电天文在HF-VHF频段采用天线组阵的方式进行观测，根据平方公里阵（Square Kilometre Array，SKA）的要求，每个阵列单元天线的增益、结构一致性、稳定性、阻抗变化趋势和极化纯度等方面需要达到较高指标，才能满足太阳、木星、再电离纪元等多种测量在极化测量、天线跟踪稳定性以及接收机宽带匹配等方面的需求。根据SKA requirement 2165：极化纯度（polarization purity）2135－38 和每极化方向灵敏度（sensitivity per polarization）2814－15提出的性能需求，以及在总结原有设计的经验后，针对10-90MHz频段，设计了一种适用于HF-VHF的新型倒“V”型栅板偶极子天线，具有重量轻，风阻小等优点，在10-90MHz的超宽频段内阻抗变化缓慢、极化纯度良好。其中，在阻抗变化方面，天线的阻抗实部从0.8Ω到631.132Ω变化，优于低频射电阵列（Low Frequency Array，LOFAR）的低频阵列天线，降低了接收机匹配难度和噪声；极化纯度方面，天线整体轴比小于0.41dB，对于太阳射电爆发等强极化信号具有良好的极化隔离度。

关键词： 倒“V”型栅板偶极子天线；HF-VHF射电阵列；超宽带；极化纯度；天线阻抗
中图分类号：TN827+.2　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1672-7673（2023）02

宇宙间天体辐射大量的电磁波,这些电磁波能够穿透云雾到达地球表面。通过接收和处理来自天体的无线电信号可以研究宇宙现象，探索自然奥秘[1]，然而这些信号非常微弱，为了能收到此类信号，须增大射电望远镜口径并提高灵敏度[2]。SKA作为下一代米波至厘米波段射电望远镜，将建设低频孔径阵列、中频孔径阵列和中频反射面天线阵列3种接收天线阵列，接收面积达到平方千米量级，建成后比目前世界上最大的厘米波综合孔径射电望远镜JVLA (Jansky Very Large Array)的灵敏度提高50倍，搜寻速度提高 10000 倍。SKA以纳秒级的采样获得精细的时间结构，以10 Pb /s 的速率产生超越全球互联网总量的数据,以宽视场、多波束、高动态、高分辨和大数据为核心概念的平方千米阵列将颠覆射电天文学的传统研究手段，给天文学研究带来革命性全新的理念[3]。21世纪初,高速数字器件发展非常迅猛;雷达技术从无源阵列—有源阵列—数字阵列,体系不断重构与演进，也为SKA带来了新的思路，2000年左右,荷兰科学家率先开始探索研制了一种数字波束形成架构的新体制低频射电望远镜LOFAR,并于2013年建成, 有效验证了数字阵列架构的体制在大视场、灵活性、成像等方面的卓越性能 SKA在这个阶段发展过程中,也逐步确立了多天线小口径组阵的技术路线,因此在其构建的3大望远镜架构中,稀疏孔径阵列和致密孔径阵列两大望远镜都采用数字阵列体制，稀疏孔径阵列借鉴了LOFAR技术,进行更大规模的组阵[4]。

LOFAR可以进行灵活的多波束成像和波束成形测量，对外太空进行深度高角度分辨率无线电调查[5]。主要分为两个频段：LOFAR低频阵（LOFAR-LBA，10-90MHz）和LOFAR高频阵列（LOFAR-HBA，110-250MHz）。LOFAR低频阵属于HF-VHF频段，该频段观测在空间天气、太阳射电[错误!未找到引用源。]、太阳系内行星爆发[7]、脉冲星和暂现源[8]、宇宙早期再电离[错误!未找到引用源。]等

基金项目：国家自然科学基金天文联合基金培育项目（U2031133）；
科技部平方公里阵列射电望远镜（SKA）专项：面向宇宙再电离探测的低频实验与观测（2020SKA0110202）；
中国科学院国际伙伴计划:“一带一路”国家北斗导航电离层基础信息低频射电监测平台合作(114A11KYSB20200001)。
作者简介： 王卫东，男，硕士，研究方向：相控阵天线、数字多波束阵列、长波天线。Email:15202955454@163.com

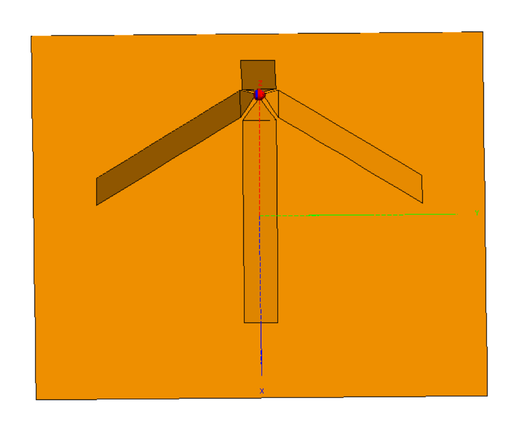
诸多领域有着重要的研究价值。例如在太阳射电领域，对应1-2个太阳半径高度的日冕层，其中日冕物质抛射（Coronal Mass Ejection，CME）的低频观测可以作为有效地对高能粒子、地磁暴、电离层扰动等空间天气事件进行预警。在脉冲星方面，近年来随着低频射电波段观测设备的兴起，该频段成为了脉冲星观测的热门频段错误!未找到引用源。。

根据天线阵波束合成原理，一个天线稳定的跟踪性能，取决于良好的阵列单元波束阻抗特性，要求天线单元在工作频段内具备良好的阻抗匹配性能，没有失配恶化情况。其次要求天线单元在跟踪的波束范围内具备良好的方向图特性，不产生辐射能量突然剧降等凹坑。最后通常要求整个阵列单元之间的耦合相对较小，不产生强互耦造成的扫描盲区。

根据LOFAR和SKA对低频阵列中天线单元的要求[11]，天线单元需要具备超宽带和良好的极化纯度，天线端口的阻抗变化不能太剧烈，天线要求为双线极化接收，通过后端数字合成实现双圆极化，利于射电天文中的弱信号检测。对于射电天文研究，在跟踪过程中，需要实时对天线阵的波束宽度、波束指向角度、跟踪算法进行优化调整，实现对射电天文的弱信号自适应稳定跟踪。

1 天线单元设计

倒“V”天线具有宽频带、结构简单、架设方便的特点，参考文[11]中的倒“V”型偶极子天线，为了展宽天线带宽，使天线的阻抗变化更平缓，将倒“V”型偶极子线天线转变成平板状偶极子天线，倒“V”型平板偶极子天线模型及阻抗特性如图1、图2，阻抗数据如表1。



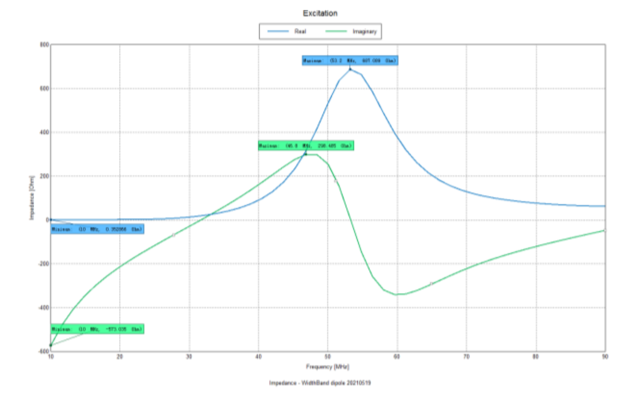




图1 倒“V”型平板偶极子天线模型

Fig.1 Model of inverted "V" plate dipole antenna

图2 倒“V”型平板偶极子天线阻抗

Fig.2 Impedance of inverted "V" plate dipole antenna

表1 倒“V”平板偶极子天线阻抗数据

Table 1 Impedance data of inverted "V" plate dipole antenna

Frequency（MHz）	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Real (Ω)	0.35	1.49	10.46	96.65	533.52	395.97	136.19	75.48	62.07
Imaginary(Ω)	-573.04	-221.93	-42.88	170.08	254.01	-341.17	-232.71	-118.36	-47.76

为了减轻天线的重量，减小风阻，考虑运输及组装时的简易性，将倒“V”型平板偶极子天线的辐射平板部分用铜线和栅板替代，将天线振子为平板、线缆、栅板时天线的电气性能进行对比，确定可以等效倒“V”型平板偶极子天线性能时线缆和栅板的数量与尺寸。

1.1 利用多根线缆等效平板

用多根线缆替代倒“V”型平板偶极子天线模型中的平板作为偶极子辐射体，线缆下方用平板连接，板平面与线缆方向平行。设置线缆直径为5mm，连接板宽度为50mm，改变线缆

数量，仿真分析其阻抗特性，线缆替代倒“V”型平板的模型如图3，不同线缆数量倒“V”偶极子天线的阻抗变化如图4，红色曲线为倒“V”平板偶极子天线的阻抗数据，不同线缆数量倒“V”偶极子天线阻抗数据如表2。

从图4中可以看出用线缆替代平板作为辐射体时，天线阻抗实部与虚部的极值点均向低频移动，随着线缆数量从3根增加至17根，天线阻抗实部最大值不断减小，天线阻抗在10M-90MHz的频带范围内的变化量逐渐减小，当线缆数量为17根时，天线阻抗的变化范围与倒“V”型平板偶极子天线接近。显然，用17根线缆代替平板作为辐射体时，其运输和组装将更加复杂繁琐。

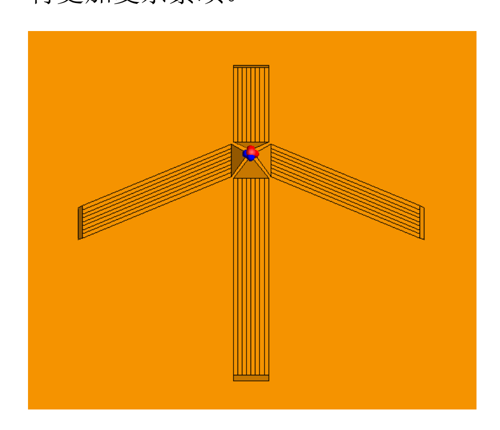


图3 倒“V”线缆偶极子天线模型（9根）

Fig.3 Model of inverted "V" plate cable dipole antenna (nine cables)

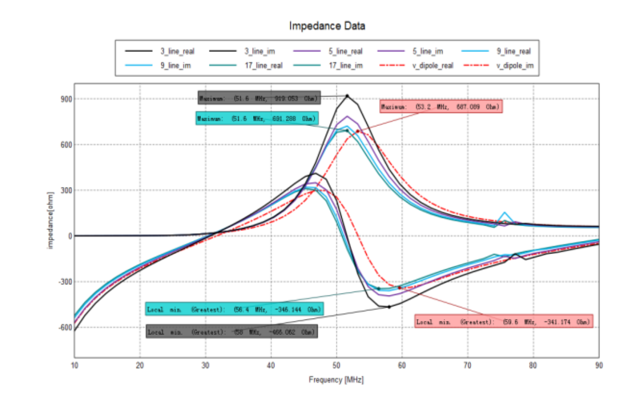


图4 不同线缆数量倒“V”线缆偶极子天线阻抗对比

Fig.4 Impedance comparison of inverted "V" cable dipole antennas with different number of cables

表2 不同线缆数量倒“V”线缆偶极子天线阻抗

Table 2 Inverted "V" cable dipole antenna impedance with different number of cables

Frequency （MHz）	3 cables		5 cables		9 cables		17cables	
	Real （Ω）	Imaginary （Ω）	Real （Ω）	Imaginary （Ω）	Real （Ω）	Imaginary （Ω）	Real （Ω）	Imaginary （Ω）
10	0.37	-623.70	0.37	-568.29	0.37	-536.89	0.37	-522.70
20	1.53	-236.13	1.53	-213.83	1.53	-200..86	1.53	-194.99
30	12.00	-31.69	11.79	-25.99	11.74	-21.64	11.74	-19.52
40	124.34	239.61	121.42	219.39	122.79	213.01	124.55	211.31
50	834.58	230.12	730.06	172.72	693.53	120.80	680.29	89.11
60	340.28	-444.63	308.40	-378.83	275.72	-343.68	-327.79	395.97
70	106.11	-235.29	97.81	-201.08	88.61	-179.29	82.93	-168.38
80	74.39	-136.11	70.81	-111.63	65.94	-92.99	64.18	-91.46
90	63.14	-54.26	60.47	-38.16	57.58	-27.58	55.83	-22.64

1.2 利用栅板等效平板

考虑加工难度及整体结构的简易性，仿真对比用五个栅条组成的倒“V”型栅板偶极子天线的辐射特性。倒“V”型栅板偶极子天线的仿真模型如图5，分别将每个栅条的宽度设置为24mm,30mm和35mm，仿真天线的实部阻抗特性如图6，阻抗数据如表3。

分析图6可知，随着栅条宽度增加，天线阻抗实部的最大值不断减小，天线阻抗实部在整个频段内的变化量减小。但随着栅条宽度变宽，天线的重量也在逐渐增加，因此综合考虑天线性能及重量，采用30mm宽度的栅条板即可。

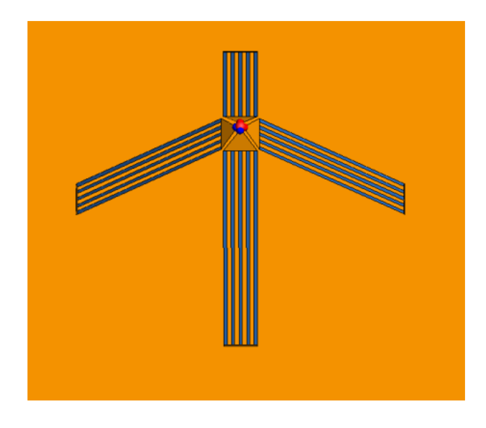


图5 倒“V”型栅板偶极子天线模型

Fig.5 Model of inverted "V" grid dipole antenna

图6 不同栅条宽度倒“V”型栅板偶极子天线实部阻抗对比

Fig.6 Impedance comparison of inverted "V" grid dipole antennas with different grid widths

表 3 不同栅条宽度倒“V”型栅板偶极子天线实部阻抗对比

Table 3 Real impedance comparison of inverted "V" grid dipole antennas with different grid widths

Frequency(MHz)		10	20	30	40	50	60	70	80	90
Real impedance with different grid widths (Ω)	24mm	0.37	1.50	15.92	107.22	627.34	331.54	97.35	73.11	62.08
	30mm	0.36	1.50	15.98	107.79	624.90	325.26	94.99	105.39	61.55
	35mm	0.37	1.51	16.03	108.17	623.64	321.90	93.41	73.59	61.26

2 倒“V”型栅板偶极子天线

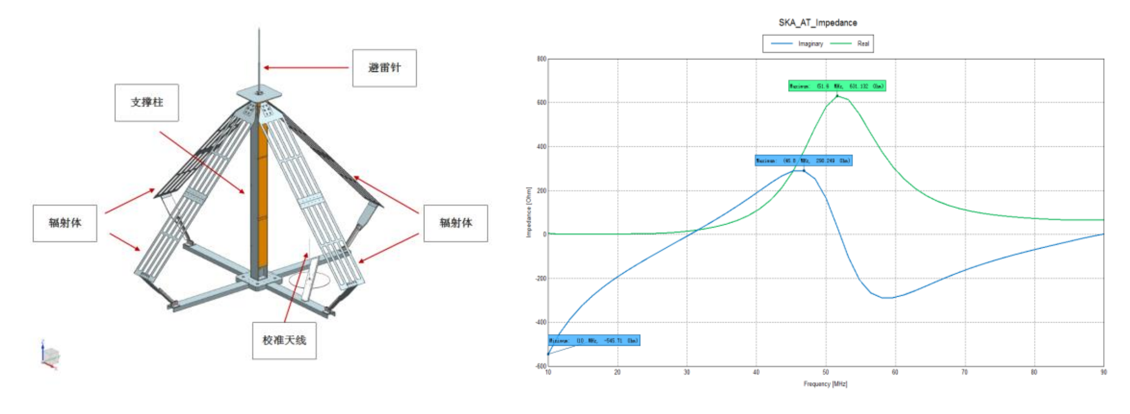


图7 倒“V”型栅板偶极子天线整体结构图

Fig.7 The overall structure of the inverted "V" grid dipole antenna

图8 倒“V”型栅板偶极子天线阻抗变化图

Fig.8 Inverted "V" grid dipole antenna impedance change diagram

2.1 天线结构

将倒“V”型平板偶极子天线的辐射平板部分用五个栅板替代，在栅板中间添加横向栅条板保证天线的稳固性，天线主体依靠绝缘介质柱支撑，辐射栅板下部通过绝缘介质与底部的十字金属结构连接。天线射频馈电模块放置于在介质支撑柱接近顶端的位置，为了提升射频模块稳定性，进行防雷设计。在天线上方安装避雷针，通过接地线将瞬时大电流引入大地，防止雷电对射频器件的损坏。在避雷针与天线之间设计绝缘介质板，隔离避雷针对天线辐射的影响。添加防雷设计后的天线单元整体结构如图7，图中橙黄色部分为金属材料，红色部分为绝缘介质（玻璃钢，相对介电常数 $\varepsilon_r = 3.5$，损耗角正切值 $\tan\delta = 0.0035$）。天线栅板条宽度为30mm，栅板总宽度为300mm，栅板总长度为1800mm，栅板下端连接板宽度为10mm，天

线顶部与绝缘板之间距离为10mm。与倒“V”型平板偶极子天线相比，改进后的倒“V”型栅板型偶极子天线重量减轻53%，栅板中间的缝隙结构减小了瞬时风阻。

2.2 天线性能

通过三维全波电磁仿真软件FEKO对倒“V”型栅板偶极子天线的阻抗、方向图、轴比等电气性能进行仿真计算，天线的阻抗、辐射方向图及轴比数据如下。

2.2.1 天线阻抗

倒“V”型栅板偶极子天线阻抗变化如图8，天线阻抗实部为绿色曲线，阻抗虚部为蓝色曲线。天线阻抗数据如表4，分析天线阻抗数据可知，倒“V”型栅板偶极子天线的阻抗实部约从0.8Ω到631.132Ω变化，与倒“V”型平板偶极子相比，阻抗实部变化量减小，更利于后端射频电路匹配。另外，由图2可以看出，倒“V”型平板偶极子天线虚部有两个谐振点，这是因为天线带宽较宽，天线振子在高频时超过了1/2波长，使得振子臂上形成了反向电流造成的，在阻抗特性方面，倒“V”型栅板偶极子天线与平板型偶极子天线类似，在一定程度上可以抑制反向电流，天线阻抗虚部更平缓。

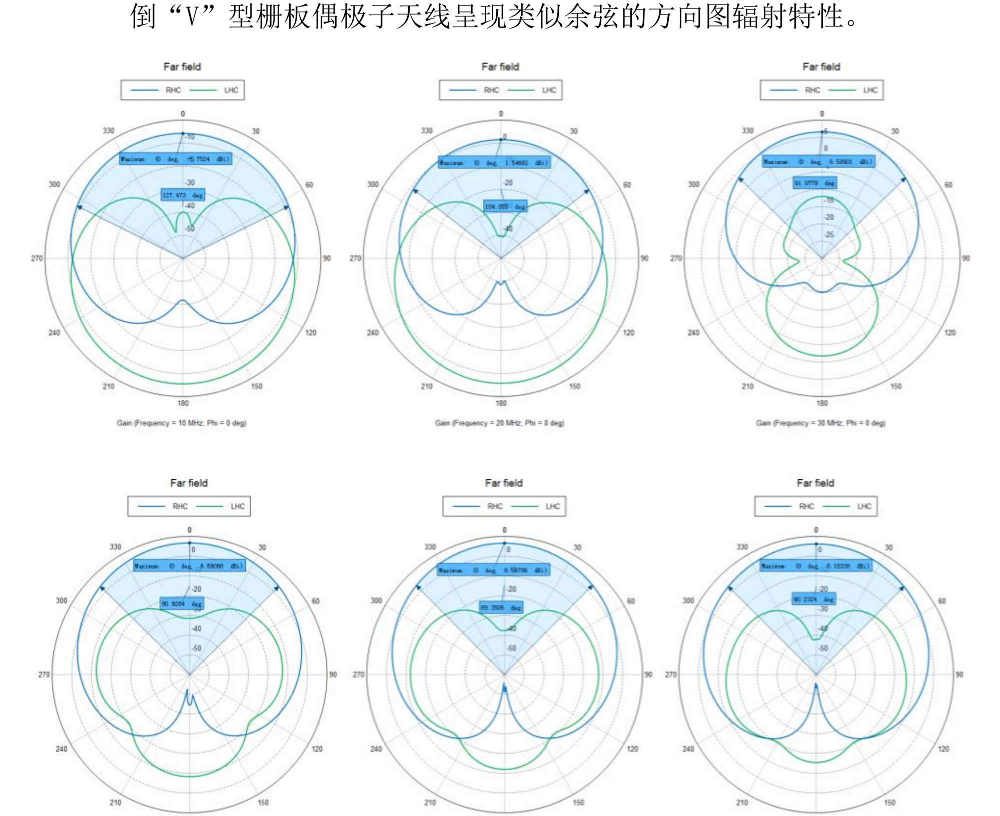
表4 倒“V”栅板偶极子天线阻抗数据

Table 4 Impedance data of inverted "V" grid plate dipole antenna

Frequency（MHz）	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Real（Ω）	5.12	1.73	11.69	115.79	115.79	308.41	117.45	71.94	66.01
Imaginary（Ω）	-545.71	-201.29	-21.54	198.38	164.41	-288.53	-172.04	-66.13	1.70

2.2.2 天线辐射方向图

对天线两个端口进行相位调制，实现圆极化，如图9，图中蓝色曲线表示天线右旋圆极化方向图，绿色曲线表示左旋圆极化方向图，蓝色箭头阴影部分为天线右旋圆极化3dB波束宽度范围，天线右旋圆极化最大增益和3dB波束宽度数据如表5。从天线方向图曲线可以看到，倒“V”型栅板偶极子天线呈现类似余弦的方向图辐射特性。



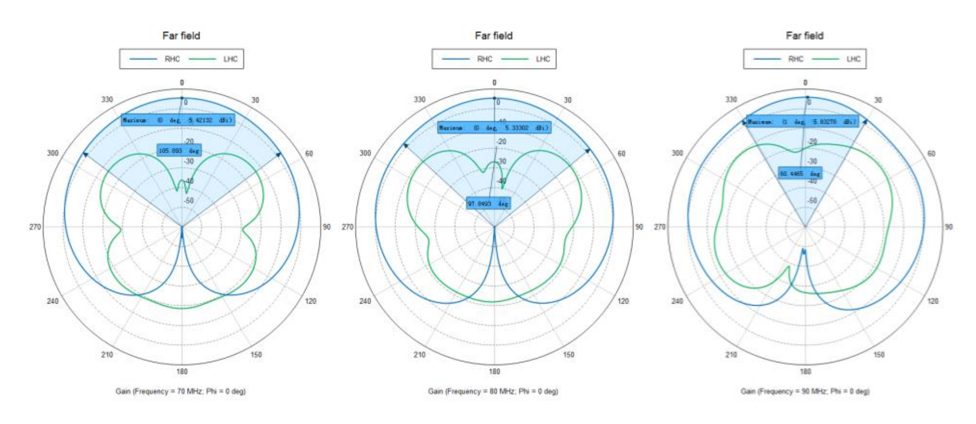


图9 天线辐射方向图

Fig.9 Antenna radiation pattern

表 5 天线右旋圆极化最大增益和 3dB 波束宽度

Table 5 Maximum right-handed circular polarization gain and 3dB beam width of antenna

Frequency（MHz）	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Maximum gain（dBi）	-5.75	1.55	6.59	6.69	6.57	6.18	5.42	5.33	5.83
3dB Beam width (deg)	124.47	104.06	91.98	90.93	89.35	90.23	105.89	97.85	60.45

2.2.3 天线轴比

天线轴比数据如表 6。可以看出天线整体轴比小于 0.41dB，极化纯度良好，抑制多径干扰能力强，利于对微弱电磁信号的检测。

表 6 天线轴比数据

Table 6 Antenna axis ratio data

Frequency（MHz）	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Axis ratio（dB）	0.27	0.21	0.31	0.29	0.22	0.24	0.34	0.39	0.40

2. 3 不同天线性能比较

我们将倒“V”型栅板偶极子天线与已研制的两种HF-VHF天线性能优缺点进行了对比，如表7。可以看出，倒“V”型栅板偶极子天线在极化隔离度、带内频响光滑度、天线-接收机匹配度等方面性能更好。

表 7 天线性能对比

Table 7 Antenna performance comparison

Performance comparison	Inverted "V" plate dipole Antenna [11]	Inverted "V" plate dipole Antenna	Inverted "V" grid dipole Antenna
Structure and construction	Simple	General	General
Polarization isolation	Good	Excellent	Excellent
Frequency response smoothness	Poor	General	Good
Match of antenna-receiver	Poor	General	Good

3 总结

本文以倒“V”型平板偶极子为基础，分别分析了用线缆和栅板替代金属平板作为天线辐射部分的方案。以电气性能、可运输性为改进原则，最终确定以5个栅条板替代平板作为辐射体的设计方案，与倒“V”型平板偶极子相比，倒“V”型栅板偶极子天线对天线减重达到53%，天线端口阻抗变化缓慢，极化纯度好。并根据实际应用环境，进一步对天线进行了防雷设计，保障了天线工作的安全性。

Design of Inverted "V" Grid Dipole Antenna

Wang Weidong[1], Xie Huanhuan[1], Liu Peng[1], Dong Liang[2]

(1. The 20th Research Institute of CETC, XI'an 710068, China, Email: 15202955454@163.com;

2.Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China)[2]

Abstract: Radio astronomy uses antenna array for observation in the HF-VHF frequency band. According to the requirements of SKA (square kilometer array), the gain, structure consistency, stability, impedance change trend, polarization purity and other aspects of each array element antenna need to reach high indicators to meet the requirements of Sun, Jupiter, Epoch of reionization and other measurements in polarization measurement, antenna tracking stability and receiver broadband matching and other aspects.

According to the performance requirements proposed in SKA requirement 2165: polarization purity 2135-38 and sensitivity per polarization 2814-15. And after summarizing the experience of the original design, this study designed a new type of inverted "V" grid dipole antenna suitable for HF-VHF for the 10-90MHz frequency band, which has the advantages of light weight and small wind resistance. The structure has the advantages of slow impedance change and good polarization purity in the ultra-wide frequency band of 10-90MHz. Among them, in terms of impedance change: the real part of the impedance of the antenna changes from about 0.8Ω to 631.132Ω, which is better than the low-frequency array antenna of the low-frequency radio array, reducing the difficulty of receiver matching and noise; in terms of polarization purity: the overall axial ratio of the antenna is less than 0.41dB, with good polarization isolation for strong polarization signals such as solar radio bursts.

Key words: inverted "V" grid dipole antenna; HF-VHF radio array; Ultra wideband; polarization purity; antenna impedance

参考文献:

[1] YU B , ZIJLSTRA A , JIANG B W. Radio stars of the SKA[J]. Universe, 2021,7(5)：119.

[2] 黎静,曹忠,王锋,等.基于Python的SKA-RASCIL中的天线增益校准实现[J].天文研究与技术,2021,18(2):226-230.
LI J, CAO Z,WANG F,et al. The implementation of the antenna gain calibration based on Python for SKA-RASCIL[J]. Astronomical Research & Technology,2021,18(2):226-230.

[3] 戴伟,汪森,李秋虹, 等. 基于Spark的SKA1-MID自校准管线分布计算实现[J].天文研究与技术,2020,17(3): 334-340 .
DAI W,WANG S,LI Q H,et al. Implementation of SKA1-MID self-calibrating pipeline based on spark [J]. Astronomical Research & Technology, 2020,17(3): 334-340.

[4] DE VOS M, GUNST A W, NIJBOER R. The LOFAR telescope: system architecture and signal processing[J]. Proceeding of the IEEE, 2009,97(8):1431–1437.

[5] DEWDNEY P E, HALL P J, SCHILIZZI R T, et al. The square kilometre array[J]. Proceeding of the IEEE, 2009, 97(8): 1482–1496.

［6］ MOROSAN D E, GALLAGHER P T, ZUCCA P, et al. LOFAR tied-array imaging of type III solar radio bursts [J]. Astronomy & Astrophysics, 2014，568（8）: A67.

[7] CAIRNS I H, JOHNSTON S, DAS P. Intrinsic variability and field statistics for pulsars B1641–45 and B0950+08 [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2004, 353(1): 270-286.

[8] STAPPERS B W, HESSELS J W T, ALEXOV A, et al. Observing pulsars and fast transients with LOFAR [J]. Astronomy & Astrophysics, 2011,530: A80.

[9] VAN HAARLEM M P, WISE M W, GUNST A W, et al. LOFAR: the low-frequency array [J]. Astronomy & Astrophysics, 2013,556: A2.

[10] COENEN T, VAN LEEUWEN J, HESSELS J W T, et al. The LOFAR pilot surveys for pulsars and fast radio transients [J]. Astronomy & Astrophysics, 2014, 570:A60.

[11] SKA phase 1 system requirements specification [EB/OL]. (2017-07-31)[2022-11-15]. https://www.skao.int/sites/default/files/documents/d3-SKA-TEL-SKO-0000008-Rev11_SKA1SystemRequirementSpecification_0.pdf.

[12] HEALD G, MCKEAN J, PIZZO R. Low frequency radio astronomy and the LOFAR observatory[M].Berlin：Springer International Publishing, 2018.